Chapitre 6

POUSSÉE ET BUTÉE - MURS DE SOUTÈNEMENT

6.1 - ÉTAT DES SOLS AU REPOS

A la profondeur z sous un remblai indéfini :

. la contrainte effective verticale (sur une facette horizontale) est $\sigma'_v = \gamma'.z$

. la contrainte horizontale (sur une facette verticale) est : $\sigma'_h = K_0.\sigma'_v$ s'il n'y a pas de déplacement latéral, K_0 étant, par définition, le coefficient de poussée du sol au repos (figure 32).

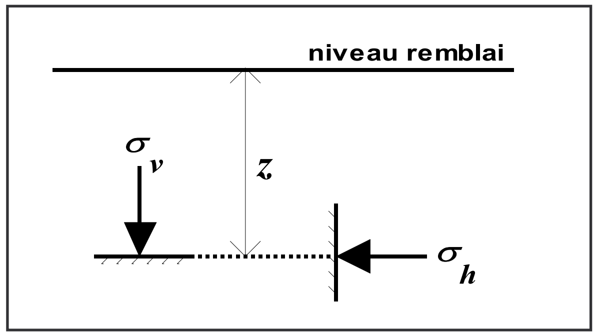


Figure 32 - contrainte au repos

Pour un sable, JAKY a montré expérimentalement que $K_0 = 1 - \sin\varphi$. Pour les argiles molles et les vases, $K_0 = 1$. Pour les argiles normalement consolidées, $K_0 \approx 0,5$.

6.2 - NOTION DE POUSSÉE ET DE BUTÉE

Imaginons un écran mince vertical lisse dans un massif de sable. Il est soumis par définition à la poussée au repos. En supprimant le demi massif de gauche, et en déplaçant l'écran parallèlement à lui même vers la droite, il se produit un équilibre dit de butée (ou passif). En le déplaçant vers la gauche, il se produit un équilibre de poussée (ou actif). La figure 33 représente la force horizontale F à appliquer à cet écran pour le déplacer d'une longueur ε.

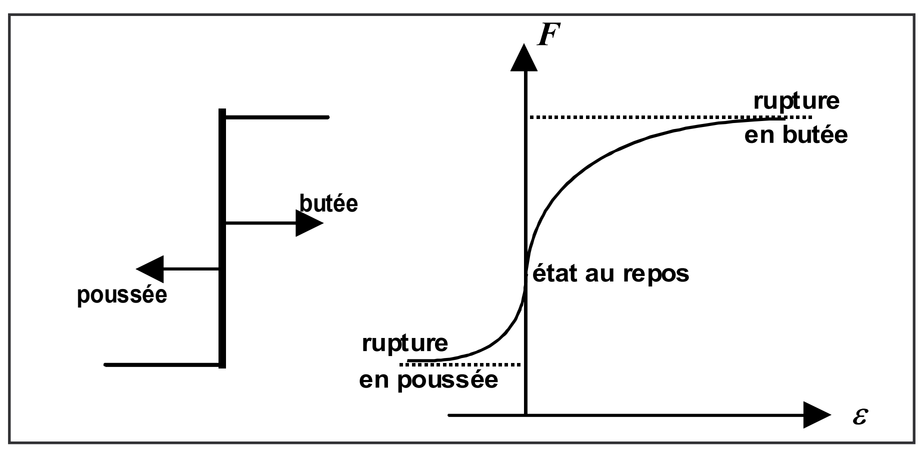


Figure 33 : principe de la poussée et de la butée

6.3 - THÉORIE DE COULOMB (1773)

Cette théorie, déjà ancienne, permet la détermination de la force de poussée s'exerçant sur un écran d'orientation verticale ou inclinée (voir la figure 34).

Hypothèses :
- le sol est homogène et isotrope ;
- le mur est rigide ;
- la surface de rupture est plane ;
- l'angle de frottement δ entre le mur et le sol est connu (δ est l'angle entre la résultante des forces de poussée et la perpendiculaire au mur) ;
- la cohésion n'est pas prise en compte.

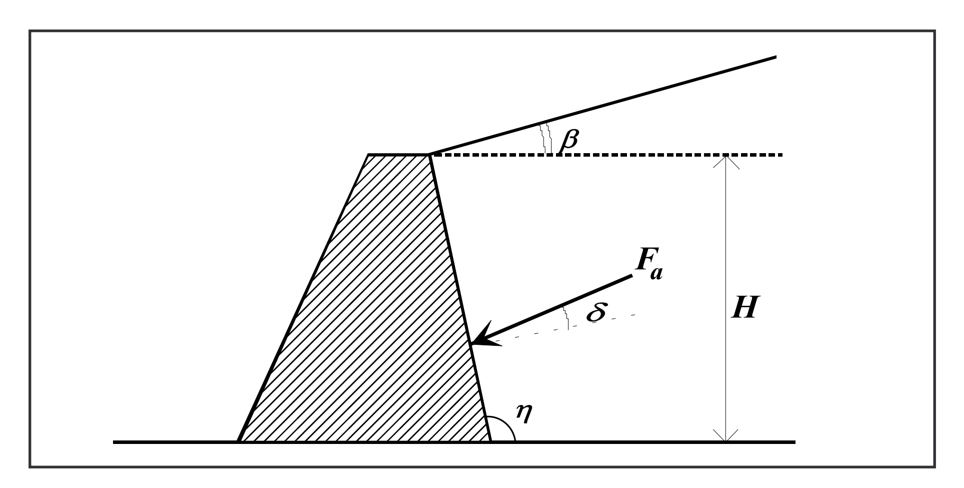


Figure 34 - poussée sur un mur selon Coulomb

$F_a = \frac{1}{2}\gamma.H^2.K_a$ où K_a coefficient de poussée, est donné par la formule de Poncelet : $K_a = \frac{sin^2(\eta-\varphi)}{sin^2\eta.sin(\eta-\delta)}\left[1+\sqrt{\frac{sin(\varphi+\delta).sin(\varphi+\delta)}{sin(\eta+\delta).sin(\eta-\beta)}}\right]^{-2}$

Pour $\beta = 0$, $\eta = \pi/2$ et $\delta = 0$ (mur lisse), on obtient :

$$K_a = \frac{1 - sin\varphi}{1 + sin\varphi} = tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

.

6.4 - THÉORIE DE RANKINE (1860)

Hypothèses :

- le sol est isotrope ;
- le mur ne modifie pas la répartition des contraintes verticales :

$\sigma_v = \gamma.h$ pour un sol à surface horizontale ;

$\sigma_v = \gamma.h.cos\beta$ pour un sol à surface inclinée d'un angle β sur l'horizontale.

Nous considérerons seulement le cas d'un écran vertical.

Pour les sols pulvérulents ($c = 0$) et à surface horizontale.

La contrainte de poussée (active) est $\sigma_a = K_a \gamma.h$ avec :

$K_a = \dfrac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} = \tan^2(\dfrac{\pi}{4} - \dfrac{\varphi}{2})$ valeur identique à celle donnée par la théorie de Coulomb avec les mêmes hypothèses. Cette formule se vérifie simplement sur le graphique de Mohr de la figure 35 où *IA = OA.sin*φ.

De même, la contrainte de butée (passive) est $\sigma_p = K_p \gamma.h$ avec : $K_p = 1/K_a = \dfrac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} = \tan^2(\dfrac{\pi}{4} - \dfrac{\varphi}{2})$.

Pour les sols purement cohérents ($\varphi = 0$).

$$K_a = 1 - 2\,\frac{c}{\gamma.h} \qquad K_P = 1 + 2\,\frac{c}{\gamma.h}$$

Pour les sols cohérents et frottants.

Un changement d'origine sur l'axe des σ tel que $OO' = H.\cot an\varphi$ ramène au cas d'un sol sans cohésion.

$$K_a = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}) - 2\,\frac{c}{\gamma.h}\tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$$

$$K_p = \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) + 2\,\frac{c}{\gamma.h}\tan(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$$

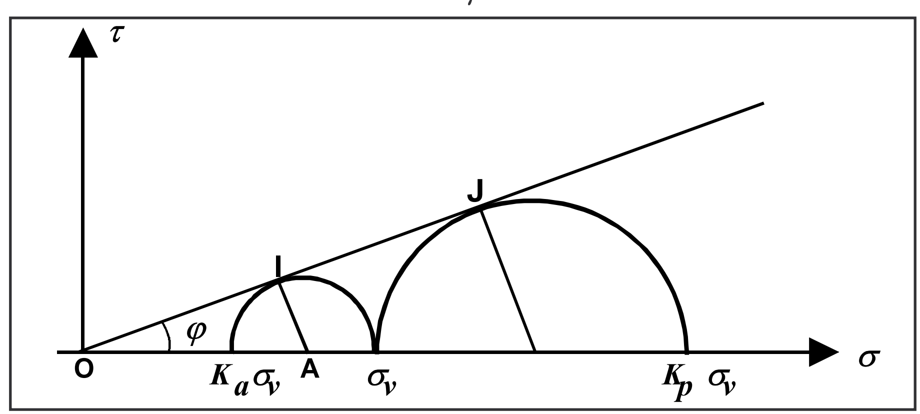


Figure 35 - représentation des états de poussée et de butée dans le plan de Mohr

6.5 - CALCUL DES EFFORTS SUR UN MUR VERTICAL

Les forces de poussée et de butée sont obtenues par intégration :

$F_a = \int_O^H K_a.\gamma.h.dh = \frac{1}{2} K_a.\gamma.H^2$ (La dernière égalité n'est valable que pour un sol pulvérulent car K_a est alors indépendant de h).

De même, $F_p = \frac{1}{2} K_p.\gamma.H^2$, si le sol est pulvérulent.

Plans de rupture

Le diagramme de Mohr (voir figure 36) montre que les surfaces de rupture, qui se développent dans le massif en terre, font avec la direction de la contrainte principale majeure un angle de :

$\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ pour la poussée (point I) ;

$\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ pour la butée (point J).

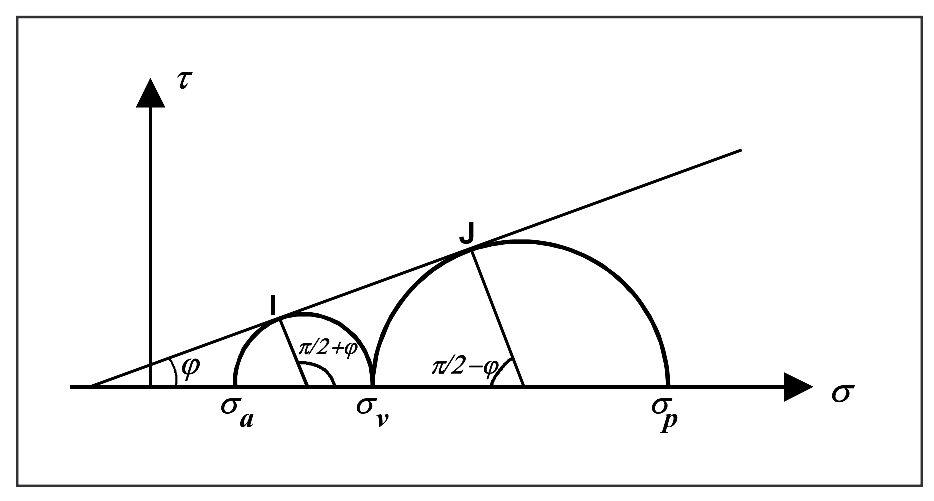


Figure 36 - surfaces de rupture en poussée et en butée

6.6 - ÉTAPES DU CALCUL MODERNE D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT

La démarche est identique à celle qui est plus complètement détaillée au paragraphe 7.2, concernant le calcul des fondations superficielles. Elle s'appuie sur les «règles Techniques de Conception et de Calcul des Fondations des Ouvrages de génie civil », C.C.T.G.[1] applicable aux marchés publics de travaux - fascicule 62 - titre V. Il est fait appel aux notions récentes de calculs aux états limites : état limite de service (ELS) et état limite ultime (ELU). Ces deux états marquent le passage d'un ouvrage sûr et efficace à un ouvrage ne remplissant plus correctement sa fonction (ELS), puis à un ouvrage avec risque de rupture (ELU).

La démarche comporte les étapes suivantes :

1) analyse des zones où s'exercent poussée et butée ;
2) calcul des contraintes et des actions ;
3) calcul des combinaisons d'actions en ELS et en ELU ;
4) calcul de l'excentricité $e=M/N$;
5) vérification de la stabilité au glissement (ELU) ;
6) vérification de la stabilité au poinçonnement (ELS et ELU) ;
7) stabilité au renversement : vérifier pour ELU $e < 0,45.B$

   (B = largeur de la base de la fondation) ;
8) non-décompression du sol : vérifier pour ELS $e < B/6$;
9) stabilité vis-à-vis d'un glissement général ;
10) calcul des tassements prévisibles (cf. chapitre 5).

Le lecteur se reportera au paragraphe 7.2 pour les calculs détaillés liés à chacune des étapes décrites ci-dessus.

[1] CCTG : cahier des clauses techniques générales